



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Luftforurening og bestemmelse af kildestyrke

Nielsen, Peter V.

Publication date:
1996

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Nielsen, P. V. (1996). *Luftforurening og bestemmelse af kildestyrke*. Institut for Bygningsteknik, Aalborg Universitet. Gul serie Bind R9621 Nr. 31

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

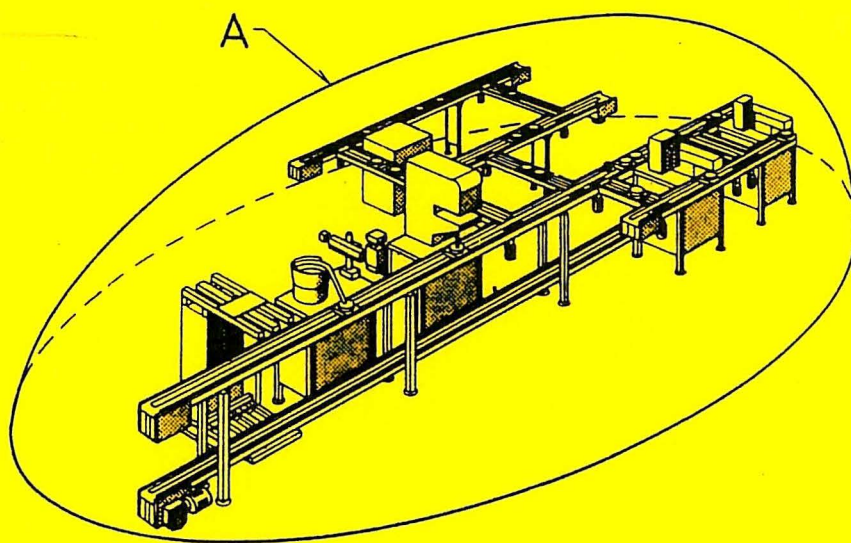
- ? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- ? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- ? You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

INSTITUTTET FOR BYGNINGSTEKNIK

DEPT. OF BUILDING TECHNOLOGY AND STRUCTURAL ENGINEERING
AALBORG UNIVERSITET • AUC • AALBORG • DANMARK



Industriventilation, Nr. 2, Teknisk Forlag, 1996

P. V. NIELSEN

LUFTFORURENING OG BESTEMMELSE AF KILDESTYRKE

JUNI 1996

ISSN 1395-7953 R9621

INSTITUTTET FOR BYGNINGSTEKNIK
DEPT. OF BUILDING TECHNOLOGY AND STRUCTURAL ENGINEERING
AALBORG UNIVERSITET • AUC • AALBORG • DANMARK

Industriventilation, Nr. 2, Teknisk Forlag, 1996

P. V. NIELSEN

LUFTFORURENING OG BESTEMMELSE AF KILDESTYRKE

JUNI 1996

ISSN 1395-7953 R9621

Luftforurening og bestemmelse af kildestyrke

Peter V. Nielsen, Aalborg Universitet

Indledning

Den grundlæggende idé i industriventilation er at lade ventilationsluften fjerne den forurening, som slipper ud i lokalet.

Det første element i denne proces er virkningen af en forureningskilde, det vil sige emission af farlige gasser, dampe, partikler, dråber eller lignende ud i den omgivende luft. Det er et begrænset antal mekanismer, der fører til forurening i en produktionsindustri, og de fleste kan samles i følgende grupper, [1]:

- Fysisk tilstandsændring (lækage fra kar, ledninger m.m.)
- Kemisk reaktion som giver gasformige stoffer (ved rumtemperatur)
- Ekstern energitilførsel (forbrænding, opvarmning ved lokal termisk eller mekanisk bearbejdelse, fordampning fra flader, tørring, ...)
- Mekanisk fragmentering (sprøjtemaling, slibning, ...)

I almindelige opholdslokaler kan der være forureningskilder i form af afgasning fra byggematerialer, rengøringsmidler og emission fra kontorudstyr.

Kendskabet til emissionens størrelse - også kaldet kildestyrken - danner grundlag for bestemmelsen af forureningsniveauet i lokalet. Hvis man for eksempel har en emission af størrelsen S mg/s, og lokalet tilføres en ventilationsluftmængde på q_o m³/s, får man en koncentration i udsugningen på

$$c_R = \frac{S}{q_o} \quad \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] \quad (1)$$

hvis ventilation og emission er tidsuafhængige (statisk).

En meget simpel model til bestemmelse af forureningsniveauet er at antage, at ventilationsluften i industrilokalet er fuldt opblandet, så koncentrationen overalt i lokalet har niveauet c_R . Andre modeller tager hensyn til den koncentrationsgradient, der må være i lokalet, her skal fx nævnes zonemodeller eller en model, der er baseret på computerberegning af luftstrømning og forureningstransport.

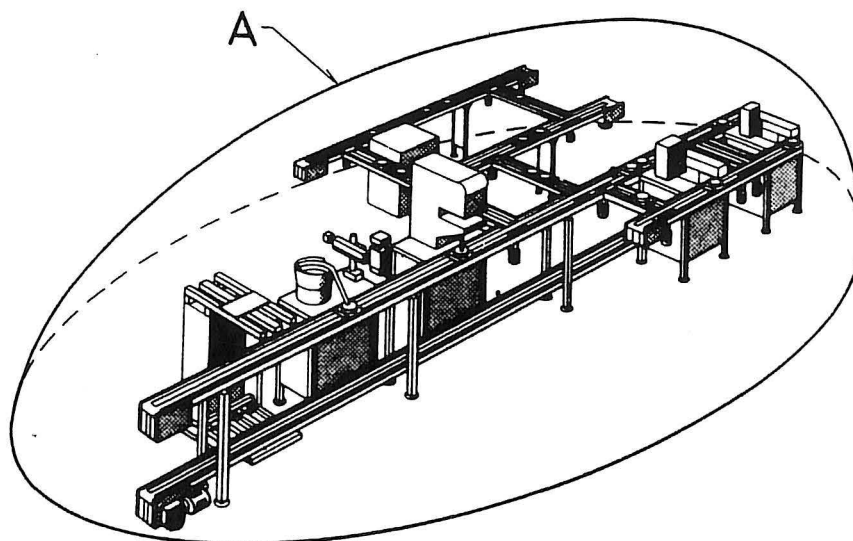
Kendskab til emissionens størrelse er vigtig, når der skal arbejdes med substitution, som for eksempel ved brug af SUBFAC-indekset, og det er nødvendigt at bestemme emissionens størrelse, når der skal foretages en optimering af en produktion med hensyn til påvirkning af

omgivelserne, det vil sige en minimering af totalemissionen. Det er også nødvendigt at kortlægge emissionen, når der arbejdes med udvikling af produktionsudstyr.

Man kan bestemme kildestyrken eller emissionen ud fra en eller flere af de metoder, der gennemgås i det følgende. Der kan være tale om at måle transporten af forurening igennem kontrolflader omkring kilden eller om at lave en indkapsling af kilden. Det er også muligt at måle kildestyrken ved at placere en udsugning over kilden, og der kan anvendes et princip, hvor man udfører en indirekte måling ved hjælp af sporgas. Endelig er det i nogle tilfælde muligt at beregne kildestyrken ud fra teoretiske data, og en simpel metode kan være at bestemme kildestyrken ud fra forbrug af det forurenende stof i produktionen.

Kildestyrkebestemmelse ved måling over en kontrolflade

Mange kilder har en så kompliceret geometri, at det ikke er muligt at måle direkte ved de områder, hvor emissionen foregår. Figur 1 viser som eksempel en montagelinie, hvor man skal undersøge emissionen af en skadelig gas fra de produkter, der er under montage.



Figur 1. Forureningskilde og kontrolflade.

Emissionen fra montagelinien - kildestyrken - kan i teorien bestemmes ved at omslutte kilden med en tænkt kontrolflade A og foretage følgende integration over fladen

$$S = \int_A \vec{u} \cdot c \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

hvor \vec{u} er den lokale hastighedsvektor ved fladeelementet $d\vec{A}$ regnet positiv for udadgående retning, og c er den lokale koncentration.

I praksis vil man orientere den tænkte kontrolflade, så den har en hensigtsmæssig placering i forhold til luftstrømningen, og man vil give den en passende facon. Den samlede flade omkring kilden kan fx opdeles i en indløbsflade og en udløbsflade samt i flader parallel med luftstrømning-

gen, hvor hastigheden i fladenormalens retning er nul.

Ligning (2) reduceres til

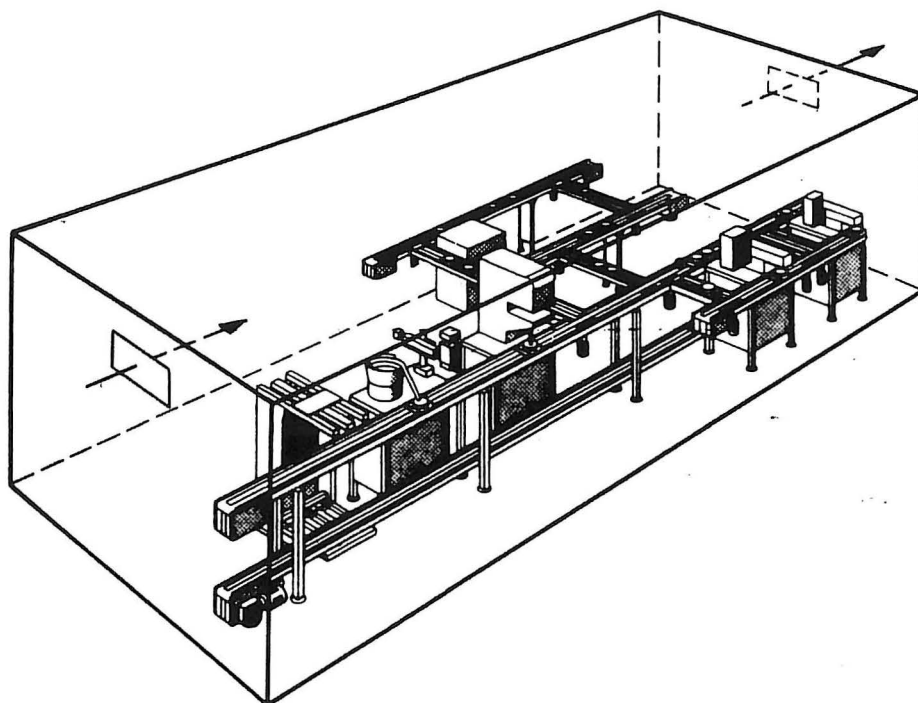
$$S = \sum_i u_{ni} c_i \Delta A_i \quad (3)$$

hvor u_{ni} er hastigheden vinkelret på fladen ΔA_i regnet positiv for en udadgående retning. c_i er den lokale koncentration.

Hvis baggrundskoncentrationen er uden betydning, er det muligt at reducere summationen til kun den del af den omsluttende flade, hvor strømmingen er udgående.

Ud over de konvektive bidrag, der er beskrevet i ligningerne (2) og (3), vil der i princippet også være en stofafhængig laminar diffusion og en strømningsafhængig turbulent diffusion, der drives af den lokale koncentrationsgradient. Den stofafhængige diffusion er meget lille i forhold til de konvektive bidrag, og den turbulente diffusion bør også holdes lav i forhold til det konvektive bidrag ved at etablere et rimeligt hastighedsniveau og ved at placere kontrolfladerne i områder med en lille koncentrationsgradient. Disse størrelser indgår derfor ikke i bestemmelsen af S .

Kildestyrkebestemmelse ved indkapsling af kilde



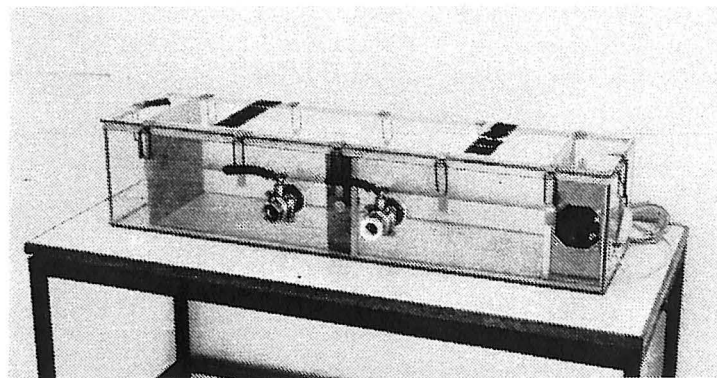
Figur 2. Forureningskilde omsluttet af fast kontrolflade.

Figur 2 viser, hvorledes det er muligt at omslutte et kompliceret maskineri som fx en del af en montagelinie med faste flader og styre luftstrømningen igennem området. Kildestyrken findes ud fra

$$S = c_R \cdot q_o \quad (4)$$

hvor q_o er volumenstrømmen igennem området, og c_R er koncentrationen i returåbningen. De faste flader kan opbygges som et telt af plastikfilm, hvilket har været anvendt i forbindelse med måling af støv fra træbearbejdningsmaskiner, men fladen kan også udgøres af lokalet, hvor maskinen er placeret, hvis der kun er den ene kilde i det ventilerede lokale.

Det er en forudsætning for brugen af ligningerne (2) til (4), at der er tale om stationære forhold, og der skal tages hensyn til eventuel absorption eller deponering af forureningen inden for kontrolfladen. I det nævnte eksempel med måling på en træbearbejdningsmaskine vil deponering af træstøv på vandrette flader give anledning til en korrektion af kildestyrken i forhold til den, der bestemmes efter ligning (4).



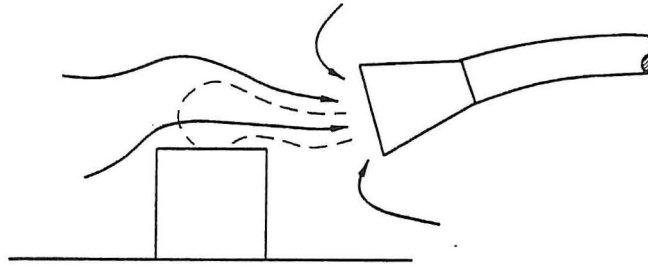
Figur 3. Testkammer til bestemmelse af emission fra byggemateriale [2].

Emission fra byggemateriale som maling, fugemasse, gulvbelægning, gulvtæpper og gulvlak kan være med til at sænke luftkvaliteten i en bygning. Emissionen kan bestemmes ved at montere materialeprøver i et testkammer og tilføre en strømning af ren luft for derefter at måle forureningen i returstrømningen fra kammeret efter det princip, der er beskrevet i forbindelse med ligning (4). Testkammeret i figur 3 kaldes CLIMPAQ (Chamber for Laboratory Investigations of Materials, Pollution and Air Quality), og det er udviklet af Statens Byggeforskningsinstitut i samarbejde med Arbejdsmiljøinstituttet. Materialeprøver af størrelsen 20×80 cm kan monteres i dette kammer i en indbyrdes afstand af 2 cm parallel med kammerets luftstrømning. Der vil typisk blive målt en TVOC emission (Total Volatile Organic Compounds) på $50 - 500 \mu g/(m^2h)$.

Hvis grænselaget i luftstrømningen har betydning for emissionen, er det vigtigt, at der skabes forhold, som svarer til dem, fladerne udsættes for i et lokale.

Et testkammer til bestemmelse af emission fra byggematerialer er ofte fremstillet af glas, rustfrit stål og teflon for at minimere problemerne med absorption af emissionsgasser.

Kildestyrkebestemmelse ved styring af luftbevægelse fra kilde



Figur 4. Strømningen omkring en kilde til en punktudsugning.

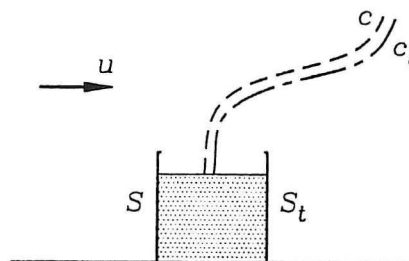
Figur 4 viser, hvorledes det er muligt at foretage en strømningsteknisk indkapsling af en emissionskilde, hvis omgivelserne er rene. Emissionskilden er placeret inden for punktudsugningens nærfelt. Den gas eller de partikler der forlader kilden vil blive transporteret ind i punktudsugningen, og kildestyrken bestemmes som produktet af den udsugede luftstrøm gange koncentrationen i udsugningen, ligning (4).

Det er vigtigt, at luftstrømningen ikke forstyrres af ekstern påvirkning. Man bør derfor vælge en gribehastighed på mindst 0.5 m/s omkring kilden.

Metoden er uegnet, hvis emissionen er afhængig af den lokale lufthastighed, og denne hastighed har en atypisk størrelse. Dette kan være et problem ved mange stoffer, der afgiver emission ved fordampning, hvor emissionen typisk kan være proportional med hastigheden opløftet i eksponenten 0.5 til 0.8, [3].

Indirekte måling af kildestyrke ved hjælp af sporgas

Det er muligt at foretage en indirekte måling af en kildestyrke ved at udføre et forsøg med sporgas, som strømningsmæssigt er analog med den virkelige situation.



Figur 5. Koncentrationsniveauet omkring en kilde og sporgasniveauet omkring en tilsvarende modelkilde.

Figur 5 indikerer, hvorledes koncentrationen c i et givet punkt er relateret til den ukendte kildestyrke S . Der opstilles en model med tilsvarende strømningsforhold, og i denne model bestemmes koncentrationen c_t i referencepunktet ved en kendt emission af sporgas S_t fra

modellen. Den ukendte kildestyrke S kan nu findes af

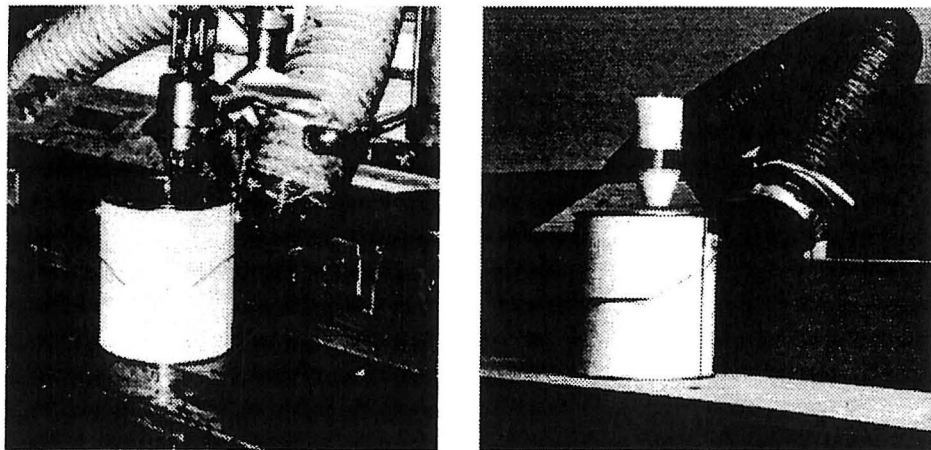
$$S = S_t \frac{c}{c_t} \quad (5)$$

Hvis der er højturbulent luftstrømning i begge situationer, er det muligt at arbejde med forskelligt hastighedsniveau efter formlen

$$S = S_t \frac{c}{c_t} \frac{q_o}{q_{ot}} \quad (6)$$

hvor q_o er volumenstrømmen omkring målesituationen, og q_{ot} er volumenstrømmen omkring modellen med sporgas.

Metoden er blevet anvendt i flere undersøgelser af industriel lokalventilation udført på Aalborg Universitet.

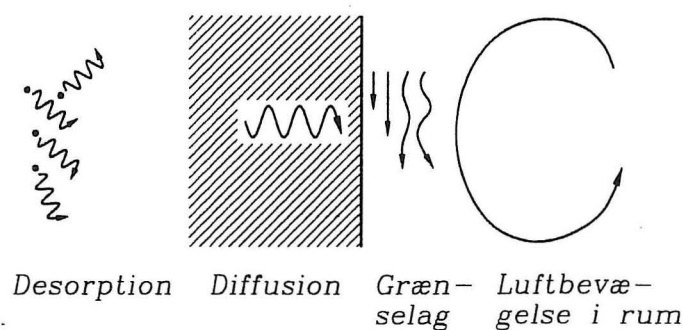


Figur 6. Maskine til påfyldning af maling samt en tilsvarende model til udførelse af emissionsmålinger, [4].

Figur 6 viser en maskine til påfyldning af maling fra farve- og lakindustrien. Som et led i undersøgelsen af lokalventilationens effektivitet blev der målt koncentration af opløsningsmidler i udsugningen fra denne fyldemaskine. Der blev opbygget en laboratiemodell af fyldemaskinen, og ud fra denne model var det muligt at bestemme emissionen i den virkelige fyldemaskine efter den metode, der er beskrevet i ligning (5). Derefter blev der udført produktudvikling på udsugningens geometri, og det blev påvist, at udsugningsluftmængden kan reduceres fra $180 \text{ m}^3/\text{h}$ til $60 \text{ m}^3/\text{h}$ i den nye konstruktion, se reference [4].

Beregning af kildestyrke ud fra teori

Det er muligt at beregne kildestyrken ud fra teori og måling på materialer, når der er tale om processer som konstant diffusion igennem et materiale og fordampning fra en overflade.



Figur 7. Emissionsproces fra et materiale der afgiver flygtige organiske forbindelser.

Figur 7 viser en skitse af de processer, der finder sted ved emission af flygtige organiske forbindelser fra byggematerialer som maling, fugemasse, gulvbelægning, gulvtæpper m.m. Forløbet starter med en desorption eller en kemisk proces, som kan være temperaturafhængig og fugtafhængig. Derefter foregår der en diffusion igennem materialet i en gas - væske - eller fast fase, og denne del af processen er afhængig af materialestrukturen. Den flygtige gas kan repræsenteres ved en koncentration c_s på overfladen, som svarer til gassens damptryk i dette område. Derefter transporteres gassen igennem grænselaget, og denne transport er afhængig af lufthastighed, turbulens, tykkelse af grænselaget og koncentrationsdifferens. Selve luftbevægelsen i rummet får især betydning for processen i grænselaget, men den kan naturligvis også påvirke temperatur- og fugtforhold i materialet.

Kildestyrken afhænger af de enkelte led i diffusionsprocessen. I de fleste byggematerialer er diffusionen i materialet styrende for hastigheden, og processen kaldes diffusionskontrolleret. Ved andre materialer, som farver og lak under tørring, er det transporten igennem grænselaget, som er styrende, og processen kaldes fordampningskontrolleret.

Diffusionskontrolleret emission kan måles i et testkammer uden at tage speciel hensyn til grænselaget som omtalt i forbindelse med figur 3. En fordampningskontrolleret emission kan enten måles i et testkammer, hvor det er muligt at styre grænselaget, eller emissionen kan bestemmes ud fra en teoretisk beregning af grænselagsstrømningen.

Emissionen eller fordampningshastigheden fra en væske eller en fordampningskontrolleret proces er givet ved

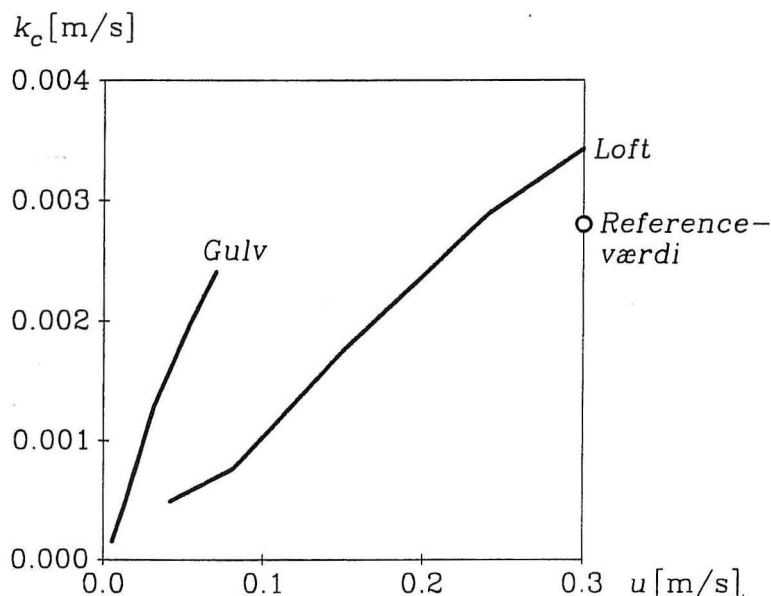
$$E = k_c (c_s - c_\infty) \sim k_c c_s \quad (7)$$

hvor k_c , c_s , c_∞ er henholdsvis stofovergangstal, overfladekoncentration og baggrundskoncentration. Baggrundskoncentrationen c_∞ har ofte et ubetydeligt niveau for emissionen, da koncentrationen altid skal ligge under den tilladelige grænseværdi for stoffet.

Man kan finde stofovergangstallet k_c fra et analytisk udtryk for strømning langs en plan flade. Det er vanskeligt at anvende dette udtryk i praksis, fordi den undersøgte geometri kan være kompliceret, og fordi luftbevægelsen i rummet er turbulent. Erfaringen har dog vist, at et

stofovergangstal på $k_c = 0,0028 \text{ m/s}$, ved en hastighed på $0,3 \text{ m/s}$, er gældende for mange flygtige gasser, [5].

Stofovergangstallet k_c kan også findes for forskellige geometrier og aktuelle rumstrømninger ved at udføre en computersimulering af luftbevægelsen og stofovergangen. Figur 8 viser resultatet af en sådan simulering af et givet rum, og det ses, at k_c er meget afhængig af både hastighedsniveauet og placeringen i rummet, se referencerne [6] og [7]. Det fremgår også af figuren, at referenceværdien $0,0028 \text{ m/s}$ har et passende niveau i forhold til de værdier, der er bestemt ved computersimulering.



Figur 8. Stofovergangstallets variation i et rum som funktion af lokal hastighed foran den emitterende flade.

Arbejdsmiljøinstitutet i Sverige har udgivet en anvisning, der viser kildestyrken for åbne kar, lækager, malede overflader m.m., som også bygger på forsøg og grænselagsteori, se reference [8].

Beregning af kildestyrke ud fra forbrug

Det er muligt at skabe et skøn over emissionen ud fra materialeforbruget. Hvis der på årsbasis bruges $M \text{ kg}$ materiale, og emissionstiden over et år er på t timer, fås følgende skøn for emissionen

$$S = \frac{M}{t} \times x \quad [\text{kg/h}] \quad (8)$$

hvor x er den del, der tilføres luften i produktionslokalet, og $1 - x$ er den del, der fjernes på anden måde. Hvis der for eksempel bruges 300 kg skæreolie pr. år i et produktionsområde, og 66% af olien vedhæftes komponenterne, vil der blive en emission på 25 g/h i tilfælde af toholdsskift over 250 arbejdsdage pr. år.

Metoden, der baseres på en form for forbrug eller intensitet, giver en usikker bestemmelse, da der arbejdes med middelværdier, men den kan anvendes i mange sammenhænge, hvor det ikke er muligt at beskrive forholdene mere nøjagtigt. Som et eksempel kan nævnes bestemmelse af emissionen i en parkeringskælder ud fra trafikregistrering eller fugtbelastning ud fra antallet af besøgende personer i en museumsbygning osv.

Valg af metode til bestemmelse af kildestyrke

Som det fremgår af denne artikel, findes der en række muligheder for at bestemme emissionen fra en forureningskilde i et industrilokale eller andet opholdslokale. Når man skal bestemme kildestyrken af meget store anlæg, der skal arbejde under naturlige driftbetingelser, vil måling over en kontrolflade og indkapsling, figur 1 og figur 2, være en velegnet metode.

Princippet bag styring af luftbevægelse fra en kilde, figur 4, kan kun anvendes ved meget små kilder, da luftforbruget ellers bliver for stort, og det er i praksis nødvendigt, at emissionen er uafhængig af lufthastigheden.

Indirekte måling på en model ved hjælp af sporgas er en yderst velegnet metode, hvis anlægget ikke er for stort, og det er et godt værktøj til brug ved optimering af maskingeometri og lokaleventilation.

Computersimulering af luftstrømning og massetransport åbner for nye muligheder til bestemmelse af kildestyrken. Metoden kan anvendes med fordel, hvor der er tale om fordampningskontrolleret emission. Metoden kan også anvendes som en indirekte model med mulighed for at arbejde med optimering af lokalventilation.

Bestemmelse af emission ud fra forbrugsdata eller intensiteter er en simplificeret metode, som i mange tilfælde kan give en skøn over kildestyrken, men den kan kun give middelværdier over et langt tidsrum. Det er vanskeligt at bruge de fundne værdier til optimering af systemer.

Litteratur

- [1] Korostenski, J. og P. Vikström, Kartläggning och katalogisering af källstyrkor, Grafiska Forskningslaboratoriet, Sverige, 1985.
- [2] Gunnarsen, L., P.A. Nielsen og P. Wolkoff, Design and Characterization of the CLIMPAQ Chamber for Laboratory Investigations of Materials, Pollution and Air Quality, Indoor Air, Vol. 4, pp. 56 - 62, 1994.
- [3] Sissom, L.E. og D.R. Pitts, Elements of Transport Phenomena, McGraw-Hill Book Company, 1972.
- [4] Nielsen, P.V., U. Madsen og D.J. Tveit, Experiments on an Exhaust Hood for the Paint Industry, Ventilation '91, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc., Cincinnati, Ohio, 1991.
- [5] Olsen, E., I. Olsen og B. Jørgensen, Substitution - Anvendelse af SUBFAC-Indekset som Substitutionskriterium, Arbejds miljøfondet, København, 1990.

- [6] Jensen, G.P. og P.V. Nielsen, Transfer of Emission Test Data from Small Scale to Full Scale, Proceedings of Healthy Buildings '95, Milano, Italien, 1995.
- [7] Nielsen, P.V., Healthy Buildings and Air Distribution in Rooms, Proceedings of Healthy Buildings '95, Milano, Italien, 1995.
- [8] Olander, L., Beräkningssamband för Luft og Luftföroreningar - En Litteratursammanställning, Arbetsmiljöinstitutet, 1994:17, Stockholm.

